

超声相控阵探头声场优化设计仿真

施义茂, 张建寰*, 陈仲怀, 张陈涛

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 超声相控阵技术是近年来无损检测领域的研究热点. 通过对超声阵列换能器中各个阵元施加独立的相位控制, 可实现声束的偏转和聚焦. 它可以灵活地采用多种扫描方式进行检测, 检测速度快, 灵敏度、分辨力与信噪比高, 能检测形状复杂的物体. 在相控阵超声成像检测中, 要获得分辨率高的声聚焦和清晰的图像, 声场的好坏是关键, 而声场主要取决于阵列换能器的设计, 因此阵列换能器在相控阵超声成像检测中是至关重要的. 文中以线性阵列探头为研究对象, 通过改变探头的参数进行仿真分析, 提出优化阵列的设计方法.

关键词: 相控阵; 超声检测; 聚焦

中图分类号: TB 552

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2013)03-0370-06

超声波作为一种检测手段, 已在海洋探查与开发、工业无损检测与评价、医学诊断等领域发挥了不可替代的独特作用^[1]. 在无损检测领域, 近年来的一个研究热点就是超声相控阵检测技术^[2]. 在超声相控阵检测过程中, 相控发射与相控接收是超声相控阵检测系统的核心部分, 在相控发射和接收过程中, 通过计算各阵元所需的延迟时间来精确控制声束偏转聚焦到检测的各个区域内, 从而达到对整个检测区的扫描. 目前很多学者研究了换能器参数(阵元大小、阵元间距、阵元数量、阵元频率)对换能器性能的影响, 从指向性理论出发分析方法较多, 如 Wooh 等^[3]利用指向性理论分析了超声波在空间的声束特性, 而对聚焦性能研究的较少; 本文在研究超声相控阵检测基本原理的基础上, 为了更好地实现声束的聚焦, 对相控阵探头的各个参数进行声场仿真, 通过仿真分析来说明各个参数对相控阵列的影响, 并提出优化声场的措施.

1 超声相控阵检测原理

超声相控阵换能器的设计基于惠更斯原理, 换能器由多个相互独立的压电晶片组成阵列, 每个晶片称为一个阵元, 一般是由多个阵元组成的一维或二维阵列^[4]. 每个阵元有自己独立的发射和接收电路, 通过计

算机控制的超声系统来控制各个单元的超声发射和接收, 实现对合成声束的偏转和聚焦控制^[5], 其原理见图 1, 其中 OPCM 为正交异性压电复合材料(orthotropic piezoelectric composite material)的简称.

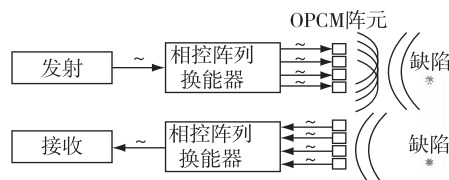


图 1 相控阵检测基本原理图

Fig. 1 Basic schematic diagram of the phased array

相控发射: 相控发射分为相控聚焦与相控偏转. 多个换能器阵元按一定形状、尺寸排列, 构成超声阵列换能器, 分别调整每个阵元发射信号的波形、幅度和相位延迟, 使各阵元发射的超声子波束在空间叠加合成, 从而形成发射聚焦和声束偏转等效果. 图 2(a)中, 阵列换能器各阵元的激励时序是两端阵元先激励, 逐渐向中间阵元加大延迟, 使得合成的波阵面指向一个曲率中心, 即发射相控聚焦. 图 2(b)中, 阵列换能器各阵元的激励时序是等间隔增加发射延迟, 使得合成波阵面具有一个指向角, 就形成了发射声束相控偏转效果^[6].

相控接收: 换能器发射的超声波遇到目标后产生回波信号, 其到达各阵元的时间存在差异. 按照回波到达各阵元的时间差对各阵元接收信号进行延时补偿, 然后相加合成, 就能将特定方向回波信号叠加增强, 而其它方向的回波信号减弱甚至抵消. 同时, 通过各阵元的相位、幅度控制以及声束形成等方法, 形成聚焦、变

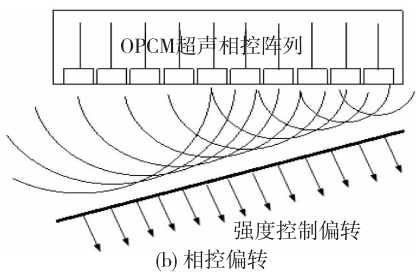
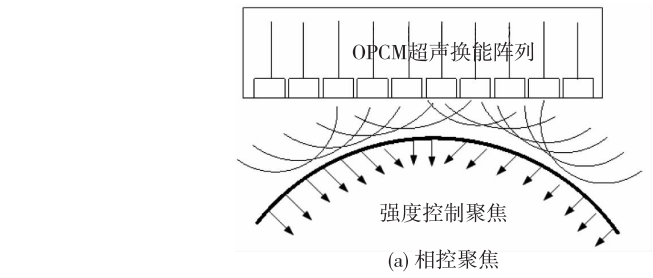


图 2 相控发射聚焦与偏转
Fig. 2 Phased launch focused and deflected

孔径、变迹等多种相控效果^[7]. 相控阵接收的原理如图 3 所示.

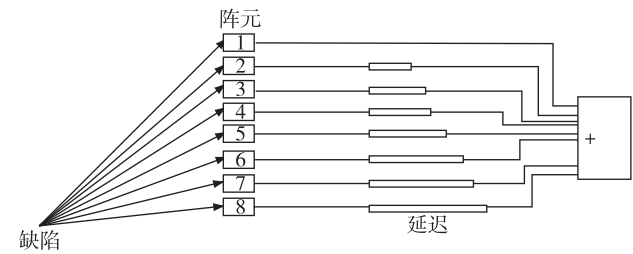


图 3 相控接收器
Fig. 3 Phase control receiver

2 阵列换能器声场辐射理论

在实际应用中,声源晶片是多种多样的,一些形状不规则的声源在数学求解过程中比较困难,甚至不能求解.在理论处理时,往往将它们理想化,在一定条件下将它们近似看作平面的理想化声源.一个有限尺寸的声源的辐射声场,根据惠更斯原理进行分析,可以看成是无数点源的组合.即辐射场中某一点声压是声源面上所有点在该点产生的声压叠加之和.

2.1 单源换能器的辐射声场

各种换能器的辐射声场分布均可由亥姆霍兹-基尔霍夫积分定理来计算.运用到单面辐射的换能器,该积分表示如下^[1]:

$$\Phi_q = \frac{1}{2\pi} \iint_S \left(-\frac{\partial \Phi_s}{\partial n} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} ds, \tag{1}$$

式中: Φ_s 为换能器辐射面 S 上的速度势; Φ_q 为辐射场中任意点 Q 处的速度势; $\frac{\partial \Phi_s}{\partial n}$ 为换能器辐射面上的法向振速分布; r 为辐射面上某积分面 ds 到场中 Q 点的矢径; n 为 ds 面元的内法线; k 为角波数, $k=2\pi/\lambda$.

根据式(1)看出,要得到积分计算值,首先要知道换能器辐射面的形状尺寸和辐射面上法向振速分布表

达式,常用的振速模式多采用均匀振动.在此种情况下,可将振模简单表示为:

$$-\frac{\partial \Phi_s}{\partial n} = u_0 q(\mathbf{R}_1), \tag{2}$$

其中: $q(\mathbf{R}_1)=1$ 即辐射面边沿自由,做均匀振动; u_0 为辐射面中心处的振速幅值.

从式(1)中还可以看出,空间声场的声压大小还与 Q 点与辐射面振动点的距离有关,由于超声具有一定的传播速度,声压还随时间不同而变化.

因此在声场中任一点 Q 的声压可以由积分表达式:

$$P = j \frac{\rho c u_0 e^{j\omega t}}{\lambda} \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} \frac{e^{-jkr}}{r} dx dy, \tag{3}$$

其中: r 为微元 ds ,到点 $Q(x, y, z)$ 的距离; u_0 为辐射面中心处的振速幅值.

xoy 平面上的矩形阵元(如图 4 所示),在阵元表面加一激励,使阵元上各点均匀振动,根据声场辐射原理和指向性函数的定义可以推导出其声场指向性函数为^[8]:

$$D(\theta_1 - \theta_2) = \frac{\sin(\frac{ka}{2} \sin \theta_1)}{\frac{ka}{2} \sin \theta_1} \frac{\sin(\frac{kb}{2} \sin \theta_2)}{\frac{kb}{2} \sin \theta_2}, \tag{4}$$

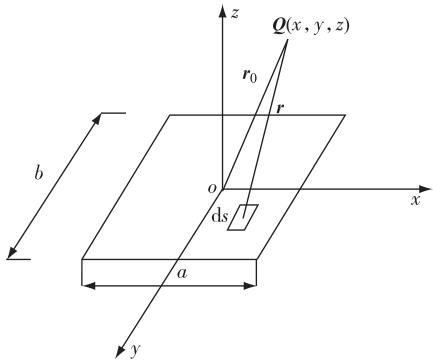


图 4 单源矩形换能器
Fig. 4 Monophyletic rectangular transducer

式中: θ_1 为 r 在 xoz 平面上投影与 z 轴的夹角; θ_2 为 r 在 $yo z$ 平面上投影与 z 轴的夹角; k 为角波数; a, b 为阵元在 x 方向和 y 方向的宽度。

2.2 阵列换能器的辐射声场

根据乘积定理^[1], 如图 5 所示的均匀条形线阵的辐射声场指向性函数等于单个条形矩形阵元的指向性函数(称为阵元因子)与 N 个位于各阵元中心的线源组成的阵的指向性函数的乘积(称为阵因子)。

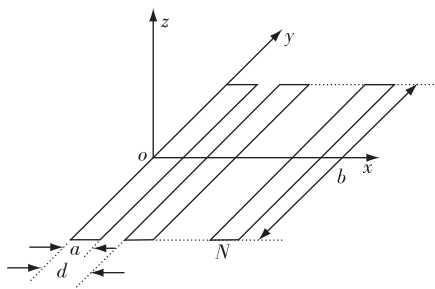


图 5 条形线阵声场计算坐标

Fig. 5 Calculation coordinates of strip line array acoustic field

N 个线源组成的均匀线阵, 当各阵元以同频率、同相位、等振幅振动时, 其声压归一化指向性函数为^[8]:

$$D(\theta_1, \theta_2) = \frac{\sin(N \frac{kd}{2} \sin \theta_1)}{N \frac{kd}{2} \sin \theta_1} \frac{\sin(\frac{kl}{2} \sin \theta_2)}{\frac{kl}{2} \sin \theta_2}, \quad (5)$$

式中: d 为相邻阵元之间的间距; l 为线源的长度; θ_1 为声线在 xoz 平面上投影与 z 轴的夹角; θ_2 为声线在 $yo z$ 平面上投影与 z 轴的夹角; k 为角波数。

根据乘积定理和式(4)、(5), 可得条形矩形阵的声压指向性函数^[8]为:

$$D(\theta_1, \theta_2) = \frac{\sin(N \frac{kd}{2} \sin \theta_1)}{N \sin(\frac{kd}{2} \sin \theta_1)} \frac{\sin(\frac{ka}{2} \sin \theta_1)}{\frac{ka}{2} \sin \theta_1} \frac{\sin(\frac{kb}{2} \sin \theta_2)}{\frac{kb}{2} \sin \theta_2}, \quad (6)$$

式中: a, b 为阵元在 x 方向和 y 方向的宽度。

3 相控阵列参数对聚焦性能的影响

在超声相控阵成像检测中, 要获得分辨率高的声聚焦和清晰的图像, 声场的好坏是关键, 而声场主要取决于阵列换能器的设计, 因此阵列换能器在超声相控阵成像检测中是至关重要的。目前实际检测时, 探头多

为均匀线阵。均匀线阵的主要参数包括: 探头频率、探头阵元数、阵元间距和阵元大小。

3.1 阵元间距的分析

相控阵阵列探头的阵元间距是标定相控阵阵列探头的关键参数之一, 较大的阵元间距能够提高阵列的指向性, 但阵元间距设置过大, 扫描时就会在实空间出现不希望有的栅瓣, 栅瓣的能量很大, 是形成伪像的主要原因。根据 Shi-Chang, Wooh 等的研究表明: 在超声相控阵检测时, 对于均匀线阵, 如果阵元间距与声波波长满足式(7)关系, 那么声束在许可偏转范围内, 将不会出现栅瓣^[3,6,9]。

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{\max}}, \quad (7)$$

式中: d 为阵元间距, 单位: mm; λ 为波长, 单位: mm; $\theta_{\max}$ 为最大偏转角, 单位: 角度。

实际上, 当阵元间距小于上式中的临界值时, 栅瓣仍旧不能完全消除。为了完全消除栅瓣的不利影响, 需对条件式(7)作进一步的强化, 最大阵元间距为^[3,6,9]

$$d_{\max} = \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{\max}} \frac{N-1}{N}, \quad (8)$$

式中, N 为阵列的阵元数目。当 N 较大时, 它的上限和下限分别为 $\lambda/2 \leq d_{\max} \leq \lambda$, 对一个包含较多阵元(一般大于 16)、阵元间距大于 $\lambda/2$ 的阵列来说, 当它的扫描范围不需要涵盖整个空间, 即扫描角度小于 180° 时, 仍可以避免栅瓣的产生; 而当阵元间距小于 $\lambda/2$ 时, 无论扫描范围为多少, 是绝对不会产生栅瓣。对于包含较少阵元的相控阵来说, 最大阵元间距 $d_{\max}$ 由式(8)严格确定, 在一些情况下它可能小于 $\lambda/2$, 否则栅瓣就会产生。

阵元间距是影响主瓣宽度的重要因素之一, 随着阵元间距的增加, 主瓣宽度逐渐变窄, 仿真结果如图 6 所示, 图 6(a)的阵元间距为 $\lambda/2$, 其主瓣宽度约为 0.8 mm, 图 6(b)的阵元间距为 2λ , 其主瓣宽度约为 0.4 mm。但是当阵元间距过大时, 超过了式(8)确定的最大值, 栅瓣就会出现, 如图 6(b)所示。因此, 为了避免栅瓣的产生, 同时为了提高阵列的横向分辨率, 在确定阵元间距时, 选择小于 $d_{\max}$ 的最大值。图 7 是与其相对应的聚焦平面压力场。

3.2 阵元数分析

在分析探头阵元数之前需要分清探头阵元数、系统独立通道数和实际检测通道数之间区别。探头阵元数是指探头可以使用的最大阵元数。而系统独立通道数则是系统在检测时可以实际使用的最大通道数^[10]。一般探头阵元数小于系统独立通道数, 系统独立通道数又大于实际检测通道数。

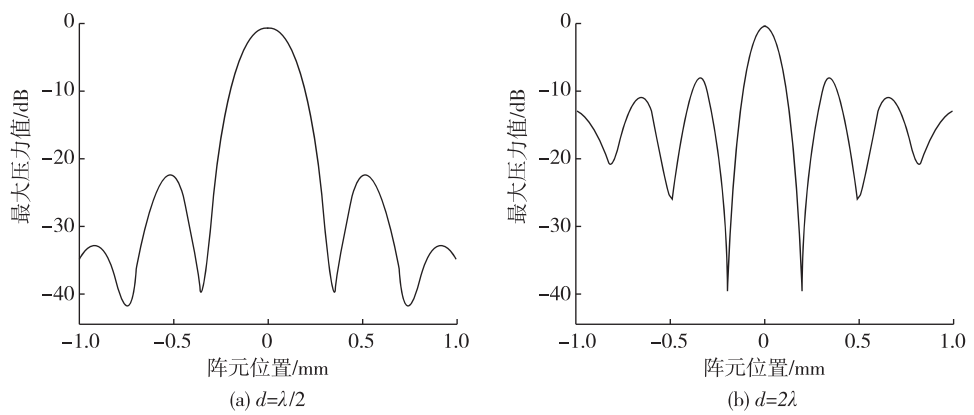


图 6 阵元间距对声束的影响分析
Fig. 6 Impact analysis of the array element spacing on the beam

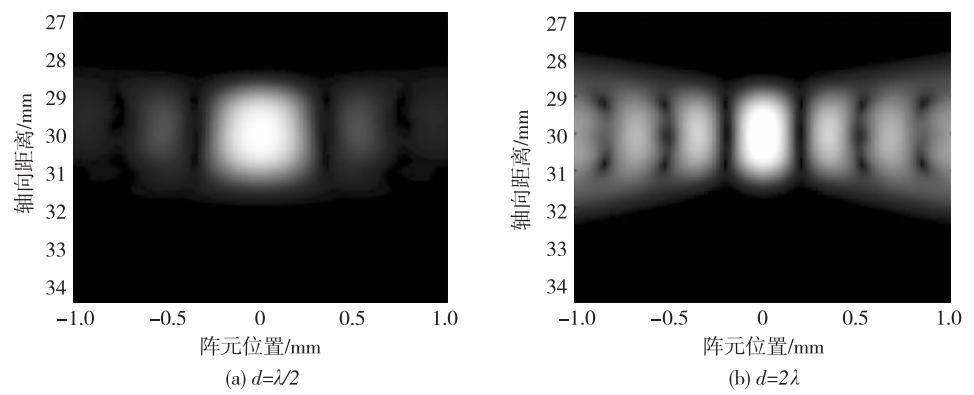


图 7 阵元间距对聚焦面的影响
Fig. 7 The affection of array element spacing on the focal plane

随着阵元数量的增多,阵列的孔径增大,从而使得主瓣宽度减小,横向分辨率增高,仿真结果如图 8 所示. 图 8 给出了阵元数目分别为 16,128 时阵列的脉冲回波响应的关系曲线. 仿真中其他参数是:探头中心频率为 2.5 MHz,阵元间距为 0.34 mm,阵元大小为 0.32 mm.

如图 8(a)所示,当阵元数为 16 时,其主瓣宽度大于 2 mm,如图 8(b)所示,当阵元数为 128 时,其主瓣宽度约为 1.1 mm. 阵元数的增多同样降低了旁瓣幅值,提高了系统的对比分辨率. 同时,阵元数的增多也增强了偏转方向上的声压,从而提高了信噪比. 因此为

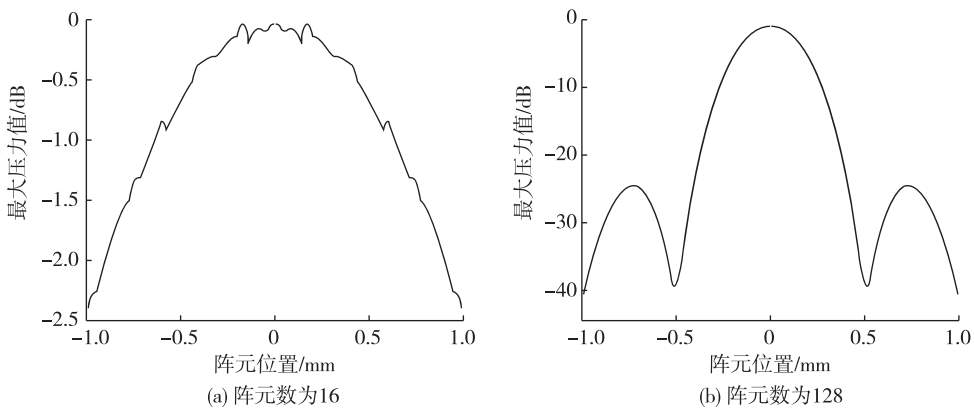


图 8 不同阵元数时声场仿真结果
Fig. 8 The sound field simulation results of Different number of array elements

了提高横向分辨率和对比分辨率,应该选择尽量多的阵元.但是,阵元数增多使得阵列孔径变大,阵列的近场变大,从而形成近场盲区,在实际应用中是不希望的;而且阵元数越多,所需的通道数也越多,电子线路就越复杂,硬件成本也就越高.图 9 是与其相对应的聚焦平面压力场.

3.3 阵元大小分析

仿真所采用的参数:探头中心频率为 2.5 MHz,阵元数量为 128.从图 10(a)、(b)中可以看出,阵元大

小为 0.5λ ,主瓣宽度约为 0.9 mm,阵元大小为 λ 时,主瓣宽度约为 0.8 mm,即在阵元间距小于 0.5λ ,即不存在栅瓣情况下,阵元大小对主瓣的影响较低,主瓣能量相差不大,但是旁瓣的压力明显降低,说明随着阵元大小的增大抑制旁瓣能力越强.从图 10(c)、(d)可以看出,由于阵元间距过大,因此存在栅瓣.

通常,在确定阵元大小 a 时,应首先满足 a ,从而确保栅瓣的消除;在此条件下,选择尽量大的阵元,提高阵列方向上的声压幅值,从而提高检测的信噪比.

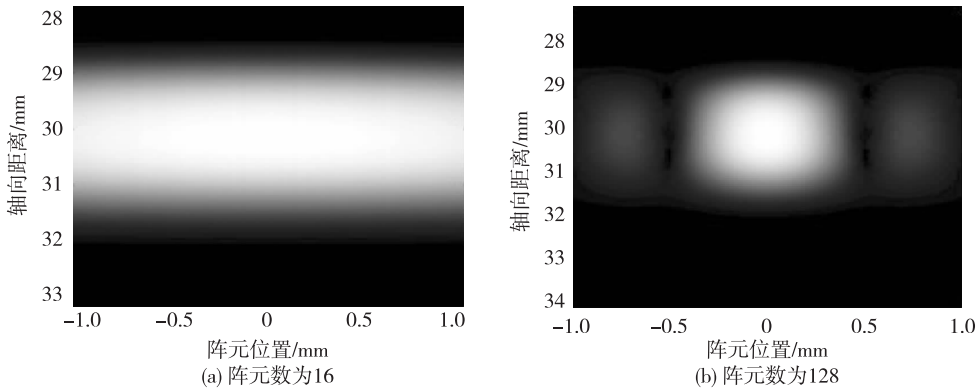


图 9 阵元数对聚焦面的影响
Fig. 9 The affection of number of array elements on the focal plane

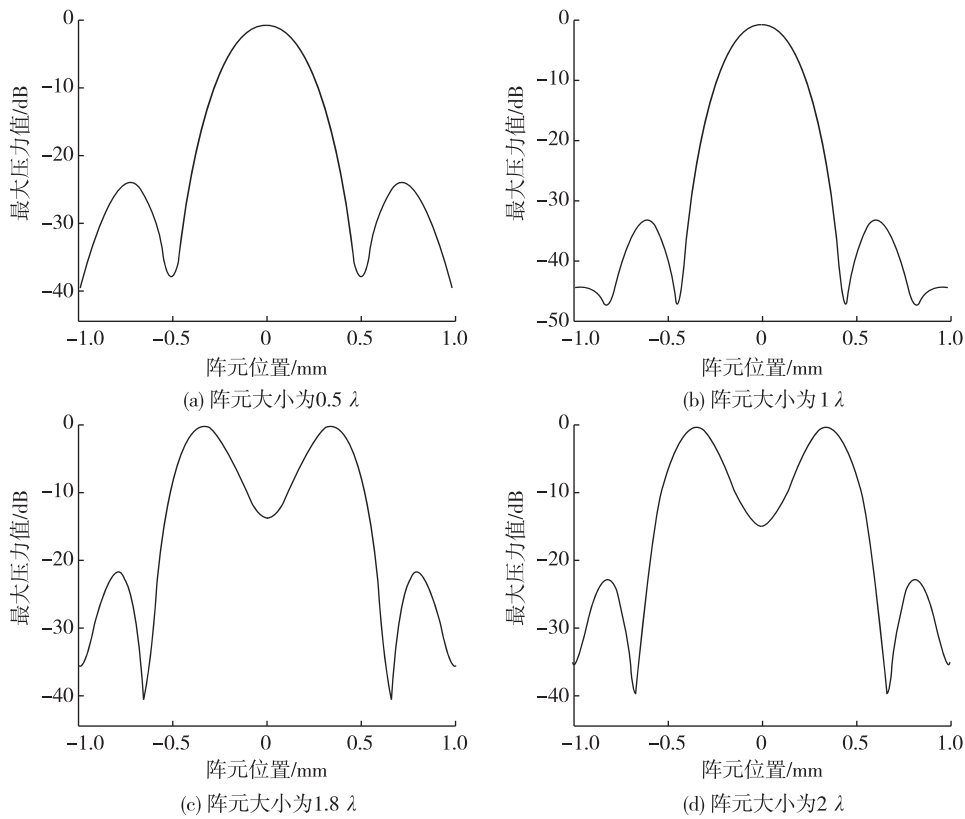


图 10 阵元大小对声束仿真的影响
Fig. 10 The affection of element size on beam simulation

4 结 论

综上所述,在优化设计相控阵换能器时,要坚持 3 个准则:1) 最小化主瓣宽度;2) 消除栅瓣;3) 抑制旁瓣. 第 1 个可以通过提高阵元数和阵元间距来实现;第 2 个可以通过适当地选择阵元间距,使其小于 $d_{\max}$ 来实现;第 3 个只有通过提高阵元数才能实现.

如今超声相控阵换能器的形状多种多样,可用于多种检测当中,本文主要对线性阵列换能器进行声场仿真,分析了超声相控阵阵列探头阵元间距、阵元大小、阵元数对探头性能的影响,为制作高性能的相控阵探头提供了依据.

参考文献:

[1] 冯若. 超声手册[M]. 南京:南京大学出版社,1999.
[2] 钟志民,梅德松. 超声相控阵技术的发展与应用[J]. 无损检测,2002,24(2):69-71.

[3] Wooh S C, Shi Y. A simulation study of the beam steering characteristics for linear phased arrays [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1999, 18: 39-57.
[4] 骆英. 正交异性压电复合材料功能元件的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2000:122.
[5] 江帆. 超声相控阵探伤系统关键技术的研究[D]. 天津:天津大学,2005.
[6] Azar L, Shi Y, Wooh S C. Beam focusing behavior of linear phased arrays[J]. NDT & E International, 2000, 33(3):189-198.
[7] 何正权,刘志宏,袁勤. 数字多声束形成技术的研究及意义[J]. 中国超声医学杂志,1997,13(8):14-16.
[8] 冯若. 超声诊断设备原理与设计[M]. 北京:中国医药科技出版社,1993:357-378.
[9] Shi-Chang W, Shi Y J. Optimum beam steering of linear phased arrays[J]. Wave Motion, 1999, 29(3):245-265.
[10] 翟亮,孙福成,蒋继伟,等. 超声热疗技术的发展与应用[J]. 中国医疗器械杂志,2002,26(4):281-283.

Optimization Design and Simulation for Sound Field
of Ultrasonic Phased Array Probe

SHI Yi-mao, ZHANG Jian-huan^{*}, CHEN Zhong-huai, ZHANG Chen-tao
(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Ultrasonic phased array technology is a research hotspot in the field of nondestructive detecting. Through each element in the device in the ultrasonic array transducer applied to the independent phase control, it can be achieved beam deflection and focusing. It can be the flexibility to use multiple scan mode to detect, it has the quick detection speed and high sensitivity and resolution and signal-to-noise ratio, detecting complex shape of objects. In the phased array ultrasonic imaging detection, to get high resolution of the sound focus and clear images, the quality of the sound field is the key, and the sound field mainly depends on the design of the array transducer, so array transducer in phased array of ultrasonic imaging detection is very important. This paper puts the linear array detector as the research object, by changing the parameters of the probe to simulate and analyze, it puts forward the design method of optimal array.

Key words: phased array; ultrasonic testing; focus